西北一次强沙尘天气的数值模拟及其诊断

曹译丹，　马敏劲，　康国强，　陈　然
（兰州大学大气科学学院，甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室，甘肃 兰州　730000）

摘　要： 沙尘天气是干旱半干旱地区的主要灾害性天气，强沙尘天气对生命健康和生活生产造成严重损失。本文利用2023年3月18日至23日的国家气象信息中心地面观测数据、MODIS卫星数据及城市空气质量数据，结合后向轨迹模式（HYSPLIT）及大气化学模式WRF-Chem，对中国西北地区一次强沙尘天气的源地及其影响范围进行讨论，并着重分析中间站点张掖强沙尘天气的形成。结果表明：此次影响中国北方大部分地区的沙尘天气呈阶段性起沙，分别在19日、20日、21日于不同区域产生，传播范围与影响区域各异。河西走廊地区沙尘主要源于酒泉市的沙尘源，WRF-Chem模拟显示张掖站的PM_{10}浓度最高，达6966.7 $\mu g \cdot m^{-3}$。张掖的沙尘事件具有上游输入和本地扬沙的双重来源：一方面，酒泉市附近超过16 $m \cdot s^{-1}$的近地面强西北风在不稳定层结影响下产生上升运动，将沙尘带至高空并向下游传播，在张掖3~4 km高度处沉降；另一方面，在上游沙尘输入前，张掖低层大气已不稳定，地面大风和风向辐合触发上升运动，扬起本地沙尘，进一步增强沙尘强度。

关键词： 强沙尘天气；数值模拟；诊断分析；西北地区

中国西北地区广泛分布的戈壁沙漠和低植被覆盖的风积黄土下垫面是沙尘天气主要源地[1]，少雨和干旱半干旱的气候条件为沙尘天气的发生提供了有利的自然条件。每年该地区的塔克拉玛干沙漠及巴丹吉林沙漠向东亚地区贡献的沙尘量约占总量的40%[2]。全球气候变化背景下，西北地区出现“气候暖湿化”趋势，尽管这一现象存在争议[3-5]，但不可忽视的是，区域气候的变化已导致沙尘现象的加剧。近年来，极端沙尘事件频繁发生[6-7]，且沙尘事件持续时间（Dust Event Duration，DED）自2013年开始不断出现上升趋势[8]，并在2015—2022年显著增加了25%[9]。2021年中国发生的两次特大沙尘天气，持续时间长、影响范围广、部分地区PM_{10}浓度超过7000 $\mu g \cdot m^{-3}$，粉尘负荷为近20 a同期最高[10]。这种强沙尘天气不仅对自然生态系统、社会财产安全带来严重损害[11]，还对人类身心健康造成了极大的威胁[12]，引发了公众的广泛担忧。

近20 a来，偏西路径型沙尘天气的形成在不断增多[13]，西北地区尤其河西走廊（以下简称河西）成为更重要的沙尘天气来源地之一[14-15]。该地区有丰富的沙源，戈壁、沙漠、沙丘及沙地、土漠和盐土平地总面积达10.7×10^4 km^2，覆盖率达89.2%[11]。河西地区沙尘多发生在春季[16]，每年春季，在冷锋、气旋等气象因素影响下，强冷空气常沿狭长的河西走廊下沉，极易在近地层形成强风，导致沙尘天气高发[17]。张掖位于河西走廊中段，南北高、中间低的地形，加剧了狭管效应，使得大风天气更加频繁[18]。此外，该地区属于荒漠草原，植被稀疏，且北临巴丹吉林沙漠、南接腾格里沙漠，使得沙尘天气具有上游输入和本地起沙双重来源[19]。李红英等[20]指出，沙尘暴通常发生在12:00—22:00，受太阳辐射引起的温度梯度和大气不稳定层结的影响。同时，若有天气系统经过，大气边界层高度可达3000 m以上，强沙尘暴时则达3200 m[21]。已有研究表明张掖地区的沙尘来源包括上游输入和本地起沙，但由于这些研究大多基于观测资料，时间分辨率较低，对其发展过程的描述仍不够精确。

WRF-Chem模式因其高分辨率和对物理过程的准确描述，被广泛用于沙尘天气的研究[22-23]，结合数值模式和卫星数据，能科学地解释沙尘气溶胶的爆

收稿日期： 2024-05-09；　**修订日期：** 2024-07-03
基金项目： 干旱气象科学研究基金项目面上项目（IAM202002）
作者简介： 曹译丹（1999-），女，硕士研究生，主要从事沙尘天气数值模拟研究. E-mail: 220220902670@lzu.edu.cn
通讯作者： 马敏劲. E-mail: minjinma@lzu.edu.cn

发和输送过程。例如，Chen等[24]利用该模型研究了沙尘气溶胶的辐射反馈对蒙古气旋引发沙尘天气的影响。陈俊言等[25]探讨了戈壁沙漠沙尘向青藏高原的输送路径及机制。虽然WRF-Chem模式在沙尘个例分析中表现出色，但其模拟能力易受起沙方案的影响。此前研究表明，Shao04方案因其对北方沙尘天气的适应性广泛应用于中国沙尘研究中[26]，但在河西地区的应用仍然较少。

2023年3月18日至23日中国北方发生了一次大范围沙尘天气过程，影响13个省(自治区、直辖市)，甘肃大部分地区受到影响，部分地区出现强沙尘暴[27]。本文通过地面气象观测数据、MODIS卫星数据及耦合了Shao04起沙参数化方案的WRF-Chem数值模拟结果，综合分析此次沙尘天气的源地、发展过程及其对城市空气污染物时空分布的影响。同时，对河西走廊中的关键站点——张掖的强沙尘天气成因进行诊断分析，以深化对河西地区沙尘传播的认识，为研究气候变化和沙尘天气的关系提供典型案例参考。

1　数据与方法

1.1　数据

卫星观测资料来自搭载于Terra和Aqua卫星上的MODIS探测器提供的大气标准数据产品MOD04_L2中的气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth，AOD)数据。地面气象观测资料来自国家气象信息中心地面观测，时间分辨率为3 h；颗粒物浓度观测资料来源于中国环境监测总站的全国城市空气质量实时发布平台，时间分辨率为1 h。为保证全文时间统一，观测资料与颗粒物浓度观测资料时间段选取为北京时2023年3月18日09:00至3月23日21:00，即2023年3月18日01:00(UTC)至3月23日13:00(UTC)。

1.2　研究方法

1.2.1　*后向轨迹模式*　HYSPLIT是美国国家海洋和大气管理局和澳大利亚气象局合作开发的欧拉和拉格朗日型混合计算模式，被广泛应用于跟踪气流所携带的粒子或气体的移动方向，在分析污染物来源和传输路径等方面具有优越性[28]。本文选取酒泉、张掖及兰州三个代表点，以2023年3月22日12:00为起始时间，对500 m、1000 m高空的气团运动情况进行72 h后向轨迹追踪。

1.2.2　*数值模式*　WRF-Chem模式是由美国大气研究中心(NCAR)、美国国家海洋及大气管理局(NOAA)、美国太平洋西北国家实验室(PNNL)共同开发完成的中尺度大气动力化学耦合模式。本文中WRF-Chem 3.9模式模拟起始时间为2023年3月18日00:00(UTC)结束时间为2023年3月23日12:00(UTC)。模拟使用美国国家环境预报中心(NCEP)提供的分辨率为1°×1°的FNL(Final Operational Global Analysis)资料作为气象场输入资料，提供模拟的初始条件与边界条件。数值模拟的模式参数设置如表1所示，起沙参数化方案采用Shao04。该方案是根据Shao01方案简化垂直沙尘通量计算后得出，该方案通过风洞试验指出产生起沙的机制应由跃移沙粒的轰击、空气拖拽力的夹卷和集合粒子的分裂三部分组成。

表1　模式参数设置

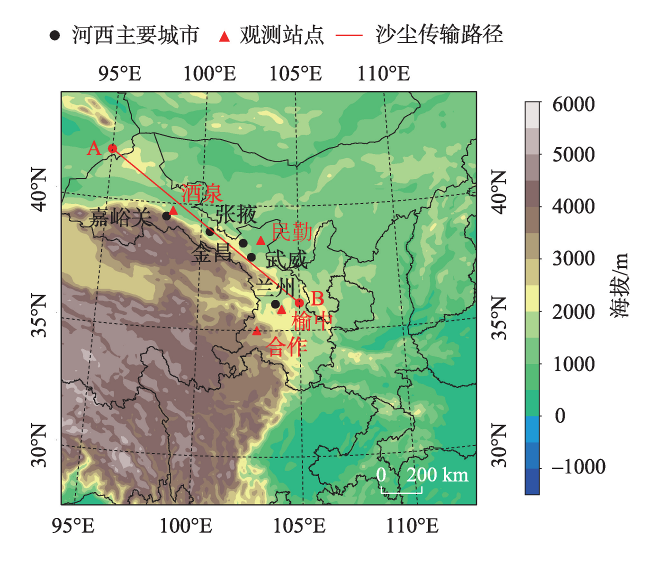
Tab. 1　Setting of model parameters

物理/化学过程	参数化方案
微物理	Lin
长波辐射	RRTMG
短波辐射	RRTMG
积云参数化	Grell-Devenyi
边界层	YSU
近地面层	Monin-Obukhov
陆面过程	Noah
气溶胶参数化	GOCART
起沙参数化	Shao04

WRF-Chem模拟区域为25°~45°N，95°~115°E(图1)，图1中AB线段为沙尘在河西走廊地区的传输分析路径。黑色实心圆点从西北到东南依次代表嘉峪关、张掖、金昌、武威及兰州5个城市。由于部分城市没有观测站，故在后期使用观测资料检验模拟结果时选用与其相近的站点资料来代替，实际所用资料的站点用红色三角表示，分别是酒泉站、民勤站、榆中站和合作站。

2　沙尘个例介绍

2023年3月20日至23日中国北方地区出现大范围沙尘天气，甘肃河西五市及兰州均出现沙尘天气，酒泉和武威出现局地强沙尘暴，酒泉PM_{10}浓度最大达到7382.0 μg·m^{-3}，张掖市内甚至出现沙墙现象。以2023年3月22日12:00起始时间，选取河西



注:底图采用自然资源部标准地图制作,审图号为GS(2020)4619号,对底图边界无修改。下同。

图1　WRF-Chem模拟区域及其地形

Fig. 1　The simulation area by WRF-Chem and its topography

走廊西部、中部、东部3个代表性城市,对其500 m、1000 m高空的气团运动情况进行72 h后向轨迹追踪。HYSPLIT后向轨迹模拟结果(图2)表明,酒泉、张掖及兰州上空500 m、1000 m的气团运动轨迹一致,自新疆北部的准噶尔盆地沿东南方向进入河西走廊,途经古尔班通古特沙漠和库木塔格沙漠。

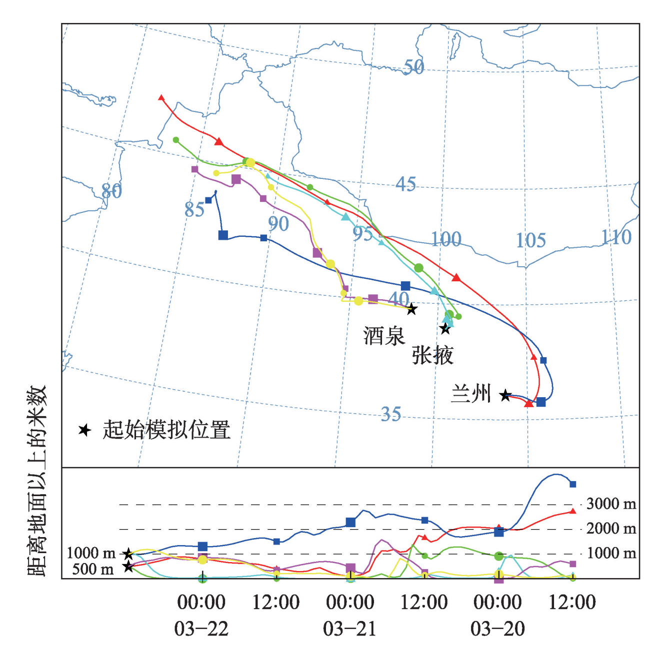


图2　2023年3月22日12:00酒泉、张掖、兰州的HYSPLIT模式72 h后向轨迹模拟

Fig. 2　72 h backward trajectory simulation using the HYSPLIT model for Jiuquan, Zhangye and Lanzhou at 12:00 on March 22, 2023

AOD可以用来表征大气中气溶胶的含量,是反映沙尘天气发生及其强度的重要指标,在中国北方,AOD值达到1.0及以上即可认为有沙尘天气发生[29]。图3显示了3月20日至23日甘肃省、青海省及内蒙古自治区部分地区的气溶胶光学厚度分布情况。3月20日(图3a)AOD高值区域主要位于酒泉市与张掖市交界处,最大值可达3.6或更高。3月21日(图3b),沙尘粒子沿河西走廊向东南移动,高AOD值区域主要集中在武威市。3月22日(图3c),沙尘气溶胶的分布范围明显减小,但兰州市部分区域的AOD值仍达到3.6。至3月23日(图3d),沙尘对甘肃大部分地区的影响基本结束。

张掖下垫面属于荒漠草原,地势平坦开阔,植被稀少,在风力作用下易产生起沙现象,受河西走廊狭管地形效应的影响,该地区极易出现大风天气使得沙尘天气更加频繁和严重。在2021年3月发生的强沙尘天气中,张掖的最低能见度在河西各城市中相对较差,仅不到0.2 km[30]。因此,本文重点关注张掖地区气象要素的实况变化,并分析其强沙尘天气的成因。

3月20日,张掖大部分地区出现了沙尘现象。从2 m温度变化可以看出(图4a),当日白天的温度较沙尘发生前两日有所下降,而夜间温度则高于前两日。这可能是由于沙尘导致地面短波辐射的净收入减少远大于地面长波辐射的净收入的增加,进而使得日最高温度降低[31]。18日至20日00:00,张掖地区的气压(图4b)呈显著下降趋势,21日后气压逐渐回升。同时,10 m风速(图4c)在20日迅速增加,达到最大风速7.5 m·s^{-1}。随着干冷空气的进入,相对湿度(图4d)在20日白天明显降低。

3　沙尘个例的数值模拟

3.1　模式模拟检验

逐小时PM_{10}浓度观测数据(图5)显示,3月20日张掖市的PM_{10}浓度峰值为5个城市中最高。通过对比逐小时观测数据,模式模拟的PM_{10}浓度序列与实测数据基本一致。这表明WRF-Chem模式在模拟沙尘浓度变化方面具有较高的准确性。值得注意的是,尽管嘉峪关位于兰州的上游,但其模拟的PM_{10}峰值却低于兰州。根据PM_{10}模拟浓度空间分布

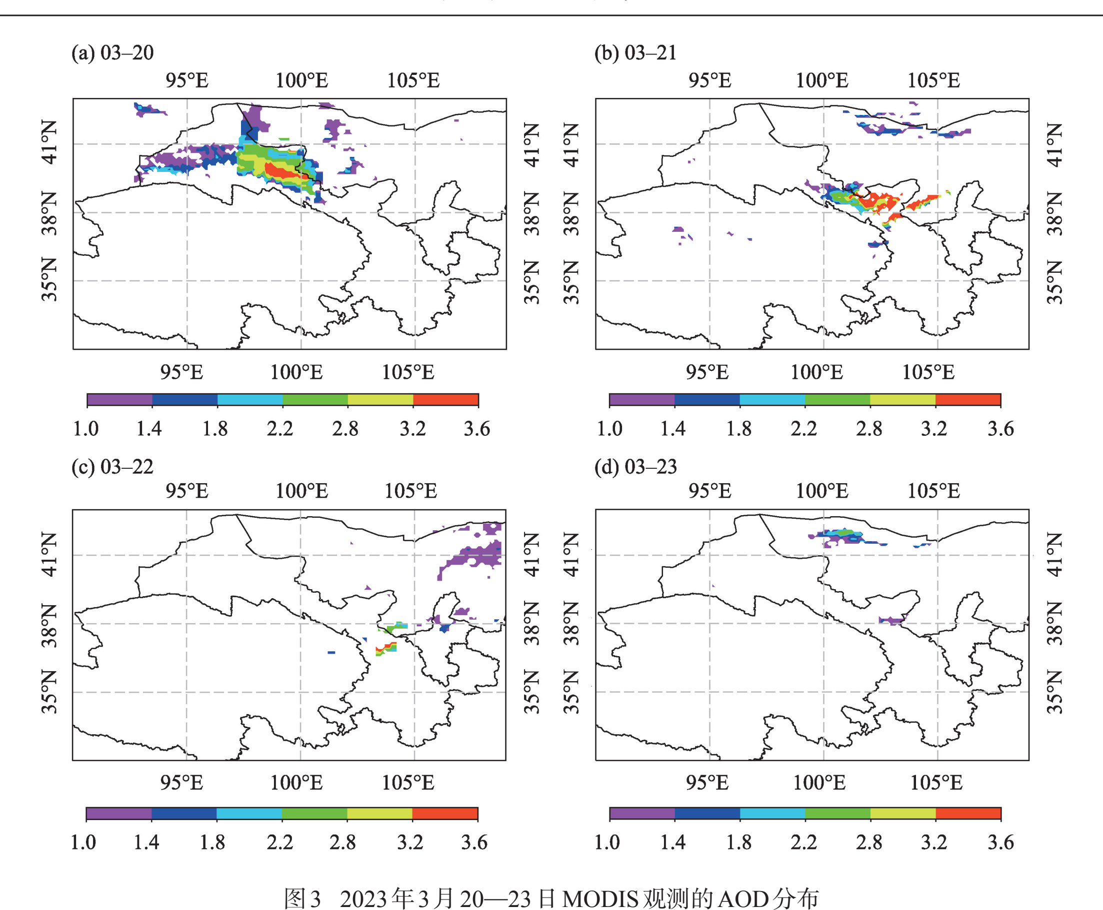


图3 2023年3月20—23日MODIS观测的AOD分布

Fig. 3 AOD distribution observed by MODIS from March 20 to 23, 2023

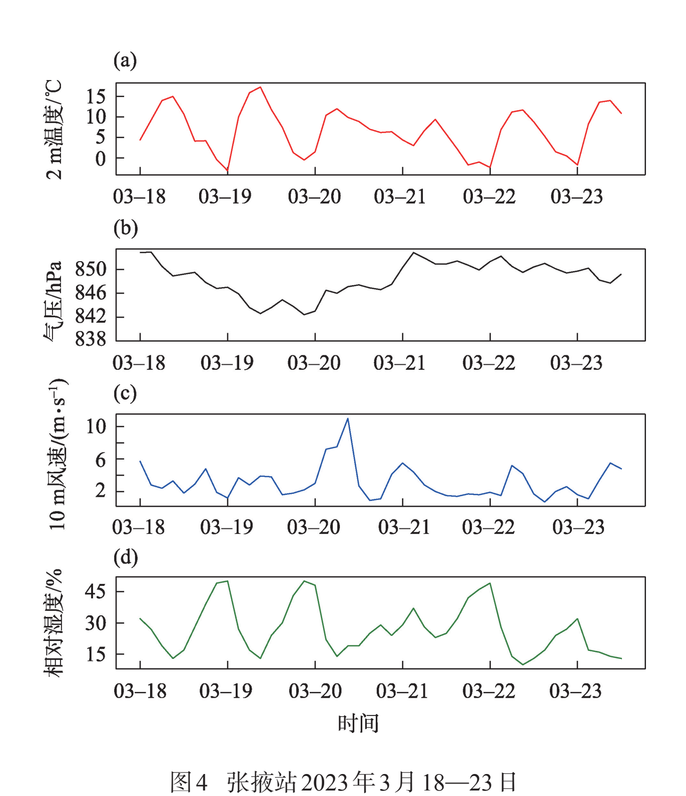


图4 张掖站2023年3月18—23日每3 h观测一次气象观测数据

Fig. 4 Zhangye station meteorological observation data every 3 h intervals from March 18 to 23, 2023

可知,这一现象是由于模拟的PM_{10}高传播区域并未经过嘉峪关站点。因此,模型结果在反映沙尘浓度的局部差异时可能受到传播路径的影响。总体而言,WRF-Chem模式采用Shao04起沙参数化方案能够较好地模拟此次沙尘天气的PM_{10}浓度变化,展现了该方案在沙尘模拟中的良好适用性。

模式对温度和相对湿度的模拟精度高于对10 m风速的模拟(图6),但整体上仍能较好地捕捉沙尘天气过程中的10 m风速的极大值,特别是在20日张掖站的风速最大值。有研究表明,当PM_{10}浓度超过0.4 $mg\cdot m^{-3}$时,与PM_{10}存在显著相关性的气象因子只有最大风速和极大风速,相关系数分别为0.671和0.701[32]。因此,准确模拟风速极大值对于沙尘强度的定性分析至关重要。

3.2 沙尘天气过程的数值模拟

PM_{10}浓度分布(图7)显示,此次大范围沙尘天气过程中存在多个不同时间段和区域的起沙现象。19日中午(图7a),新疆东南部出现起沙,其沙尘强度逐渐增强,但传播范围较小,仅在后期影响到甘肃省酒泉市北部部分区域。20日凌晨03:00

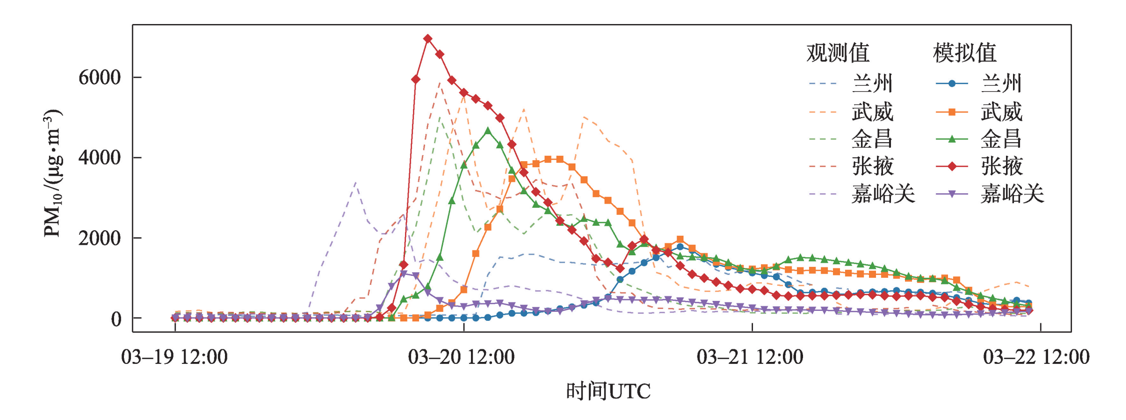


图5 沙尘传输路径中5个城市逐小时PM_{10}浓度观测结果对模拟结果的验证

Fig. 5 Validation of simulated results against hourly observed PM_{10} concentrations in five cities along the dust transport path

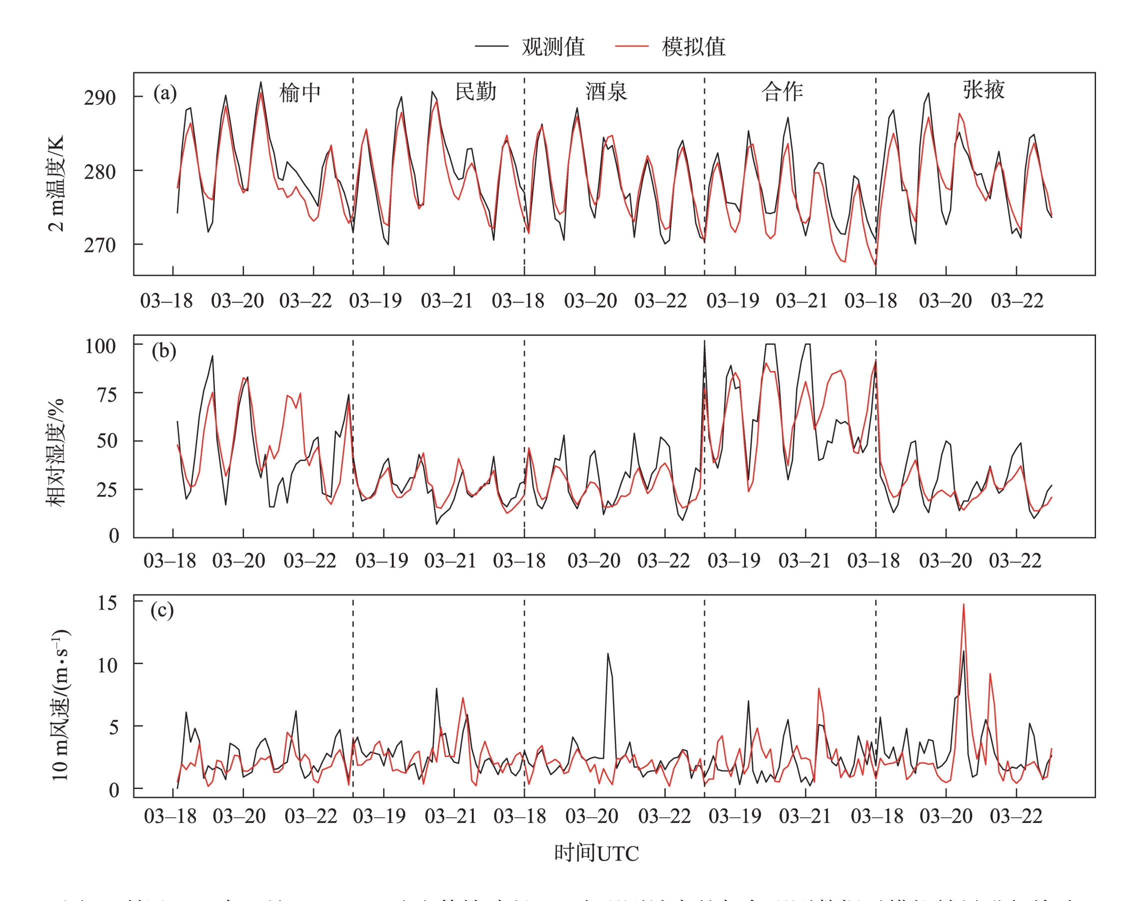


图6 利用2023年3月18—22日沙尘传输路径上5个观测站点的气象观测数据对模拟结果进行检验

Fig. 6 Validation of simulated results using meteorological observation data from five stations along the dust transport path from March 18 to 22, 2023

(图7d),酒泉市内出现孤立起沙点,虽然强度较19日减弱,但其传播范围更广,沙尘沿河西走廊向东南方向扩散,影响了甘肃省大部分地区。21日(图7g),内蒙古北部地区出现沙尘,主要影响内蒙古东部、陕西、河南及北京等地区。

此次北方沙尘天气存在多次起沙过程,但本文重点关注河西的强沙尘天气。进一步缩小研究范围,对河西地区的PM_{10}浓度演变过程进行分析。3月20日03:00(图8a),酒泉市(40.23°N,97.92°E)出现起沙点,至08:00(图8b),沙尘开始影响张掖站,14:00(图8c)前,张掖附近的PM_{10}浓度持续升高,影响范围不断扩大,14:00—18:00(图8d),该站点附近的PM_{10}浓度逐渐减小,沙尘影响趋于减弱。模式模拟结果显示,张掖站最大PM_{10}浓度达到6966.7 μg·m^{-3},

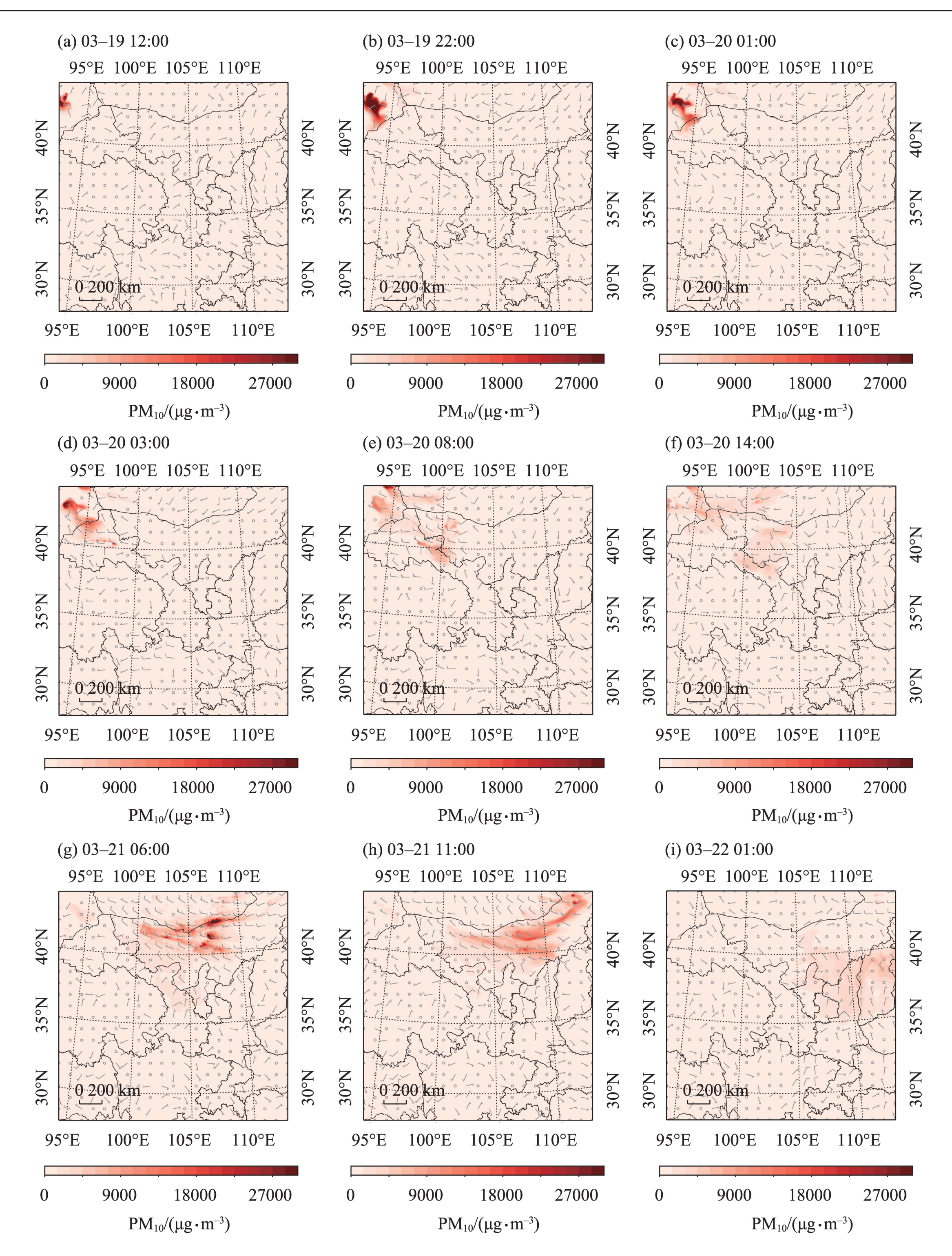


图7 2023年3月19—22日PM_{10}浓度及10 m风速空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of PM_{10} concentration and 10 m wind speed from March 19 to 20, 2023

总体来看，张掖附近的高浓度沙尘粒子的分布与3月20日AOD高值区(图3a)一致。

3.3 张掖强沙尘天气的诊断分析

张掖位于河西走廊中部，是此次西北沙尘天气影响最为严重的地区，PM_{10}浓度最大可达6966.7 $\mu g\cdot m^{-3}$，下文将基于数值模拟结果，对张掖地区的沙尘天气的成因及其传输过程进行诊断分析。

3.3.1 上游沙尘的输送 以图8a中出现在酒泉市内的独立沙尘柱(40.23°N，97.92°E)为研究对象现，对其起沙条件进行分析。沙尘发生前一日08:00、

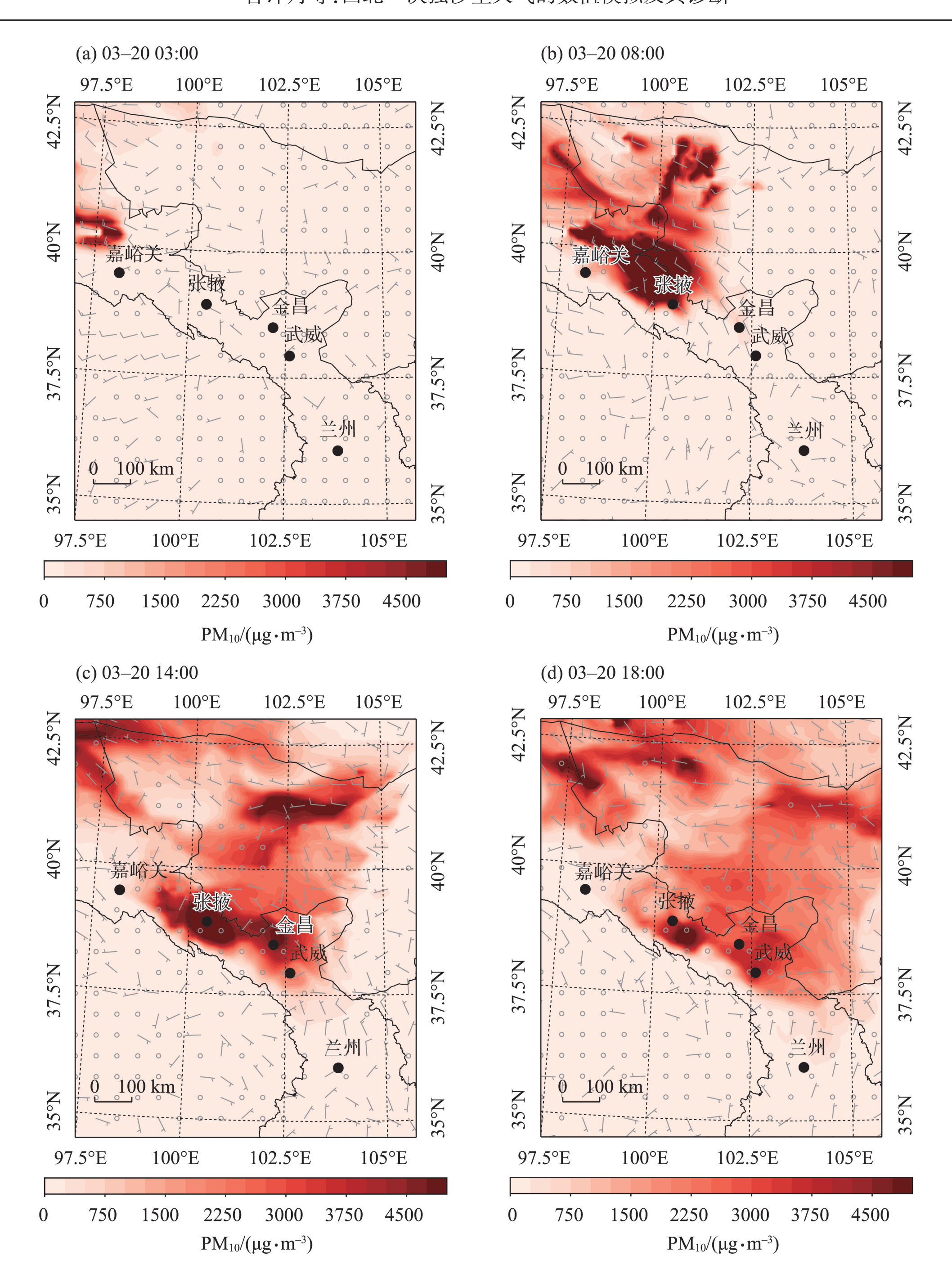


图8　2023年3月20日河西走廊地区PM_{10}浓度及10 m风速空间分布

Fig. 8　Spatial distribution of PM_{10} concentration and 10 m wind speed in the Hexi Corridor Region on March 20, 2023

12:00、16:00的温度露点差廓线(图9a)显示，8 km、2 km高度附近大气均出现了变干趋势，大气温度梯度增大，层结变得更容易发生对流。08:00(图9b)，位温与假相当位温廓线1 km以下大气呈中性层结，这是一种介于稳定和不稳定之间的中性状态，当低层大气伴有上升运动时，能够进一步激发对流。12:00(图9c)，1~2 km大气已经出现不稳定层结，高低层之间存在明显的风速切变。至16:00(图9d)，层结大气的不稳定性开始减弱，1 km以下的中性层结转为稳定层结。

10 m风速模拟结果(图10a，图10b)显示，3月20日02:00，起沙点附近存在风向及风速的辐合，此时底层大气以上升运动为主(图10c)，2 km附近垂直上升速度达到最大。上升运动使得地面空气质量减少，进一步增大气压差，对应03:00近地面出现超过16 $m\cdot s^{-1}$大风速，将地面的沙尘扬起。03:00之

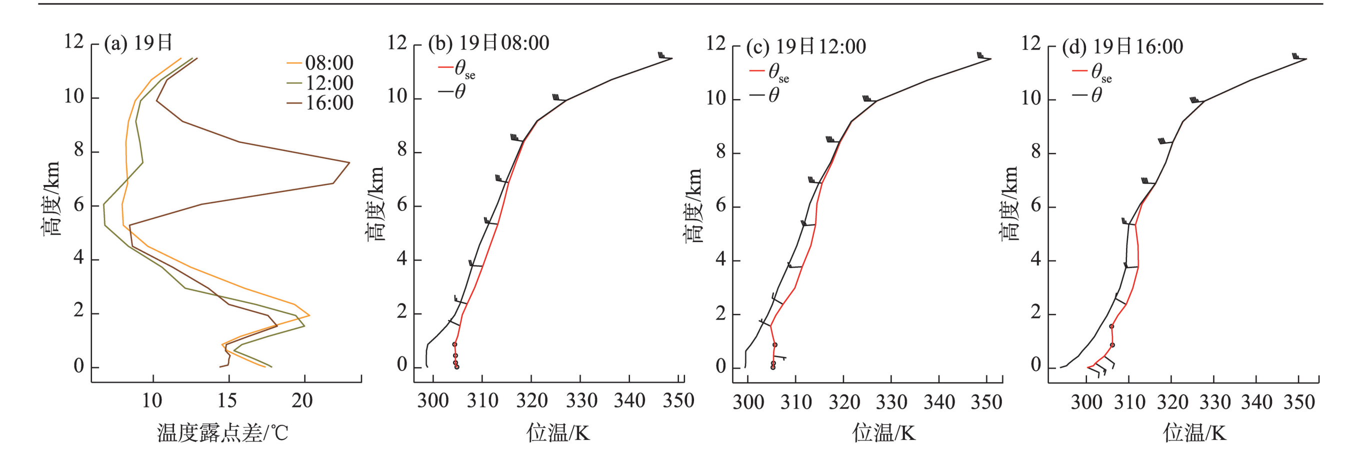


图9 上游站点3月19日温度露点差廓线及位温与假相当位温廓线

Fig. 9 Temperature-dewpoint difference profile, potential temperature, and pseudo-equivalent potential temperature profiles at the upstream station on March 19

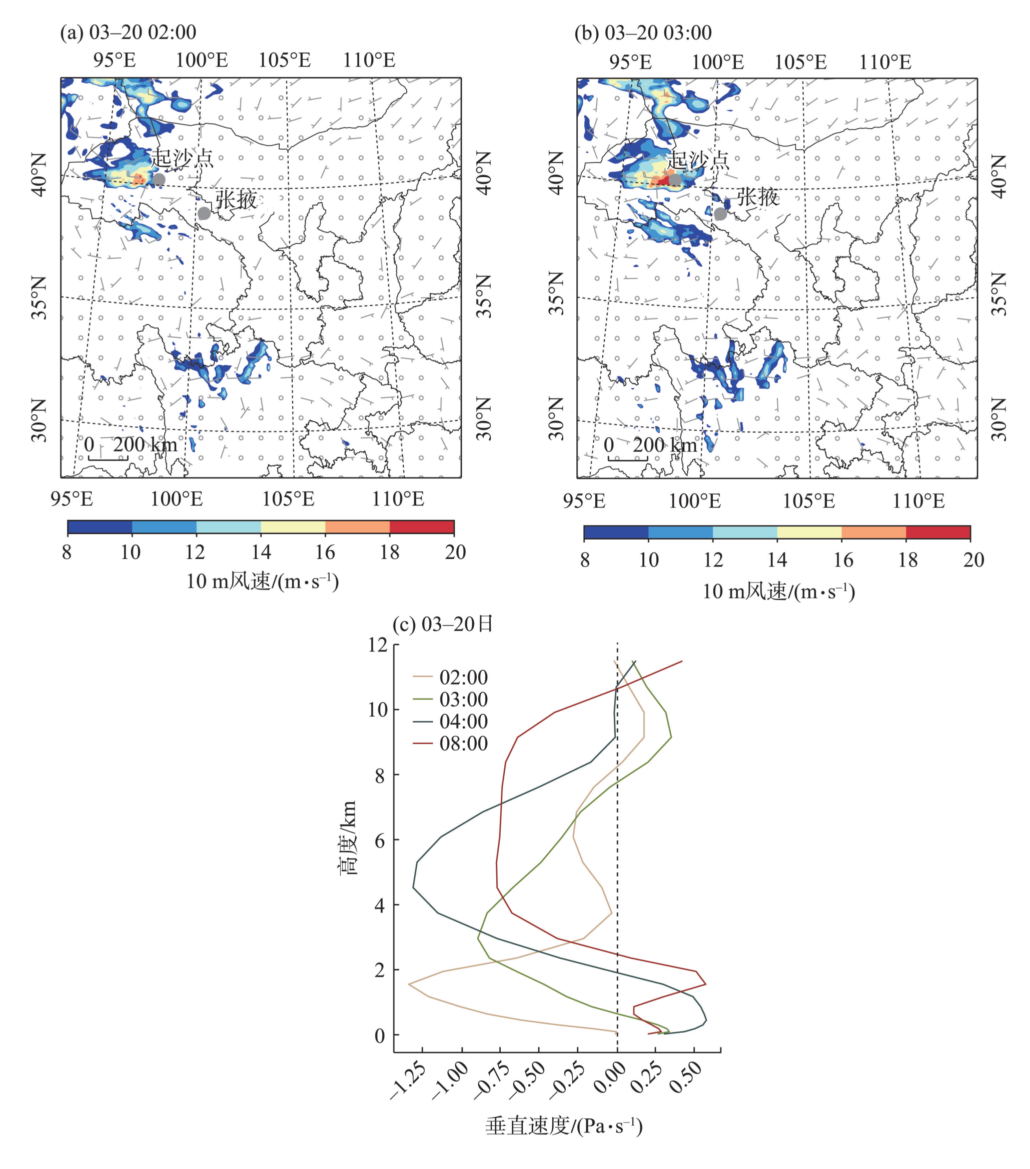


图10 上游站点3月20日10 m风速分布及垂直速度廓线

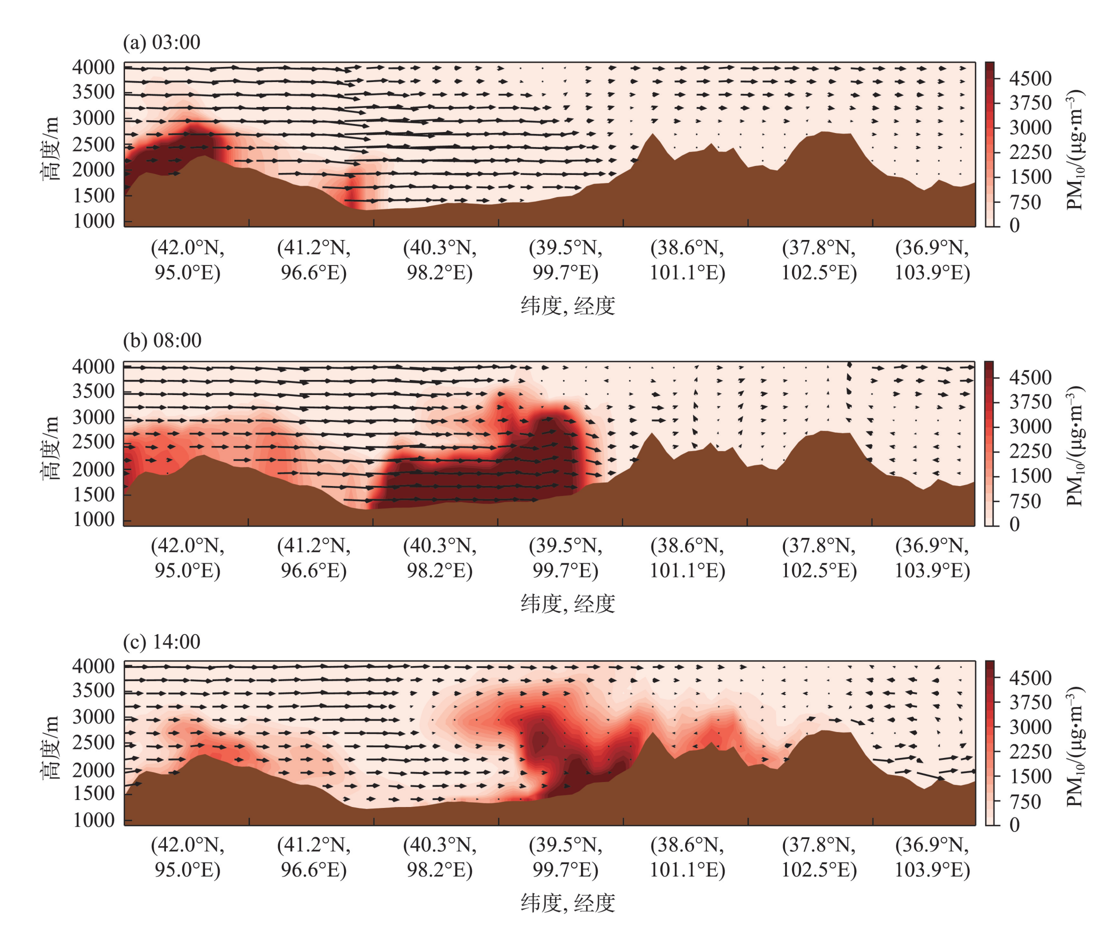
Fig. 10 Distribution of 10 m wind speed and vertical velocity profile at the upstream station on March 20

后,低层大气转为下沉运动,而2 km以上大气则转为上升运动,且这种上升运动逐渐向高层转移,可到达10 km附近,有利于将沙尘带到高层大气。

沿沙尘传播路径剖面图显示,3月20日03:00(图11a),在40°N,98°E附近出现一个独立的沙尘柱,其位置与上文所述的起沙点基本一致。08:00(图11b),张掖上空垂直剖面的沙尘浓度迅速增加,同时伴随着近地面风速的明显增强。14:00(图11c),张掖附近近地面及3 km附近的风速均显著减弱,而当PM_{10}粒子到达金昌市附近(38.6°N,101.1°E)时,浓度迅速降低。相较于张掖,金昌市地势更高,地形的阻挡和摩擦衰减作用使得风速减弱,从而不利于强沙尘天气持续。结合PM_{10}浓度模拟结果可知,03:00起沙区域(图8a)可能由强近地面风速引起。

3.3.2　*张掖本地起沙*　图12a展示了19日03:00、04:00和05:00的温度露点差随高度的垂直分布。温度露点差反映了大气层的干湿特性,值越大表示空气越干燥。随着高度的增加,温度露点差整体呈现增大的趋势,表明高空空气相对干燥。尤其在0~2 km的高度范围内,各时间点的温度露点差相对较小,表明该层大气相对湿润,而在4 km以上的高度,温度露点差明显增大,表明干燥空气占主导。19日03:00,位温与假相当位温的垂直剖面图显示(图12b),低层大气的假相当位温较低,随高度增加而逐渐趋向于位温。这一现象表明低层存在大气不稳定性,这种不稳定性可能引发湍流和对流活动。19日04:00、05:00的位温剖面(图12c,图12d)与03:00类似,但1~2 km大气的逆温结构更加明显,大气不稳定性更强。

在19日凌晨的大气热力条件影响下,张掖站在20日凌晨出现了地面大风和显著的垂直上升运动,为沙尘天气的发生创造了有利条件。20日04:00和05:00,张掖近地面风速超过10 m·s^{-1}(图13a,图13b),并伴随风向辐合。垂直速度剖面图(图13c)显示,4 km以下的大气存在上升运动,尤其在0~2 km



注:沙尘传播路径为图1中AB线段,图中箭头向右为西北风,向左为东南风。

图11　3月20日沙尘传播路径PM_{10}浓度及全风速垂直剖面图

Fig. 11　Vertical profile of PM_{10} concentration and total wind speed along the dust transport path on March 20

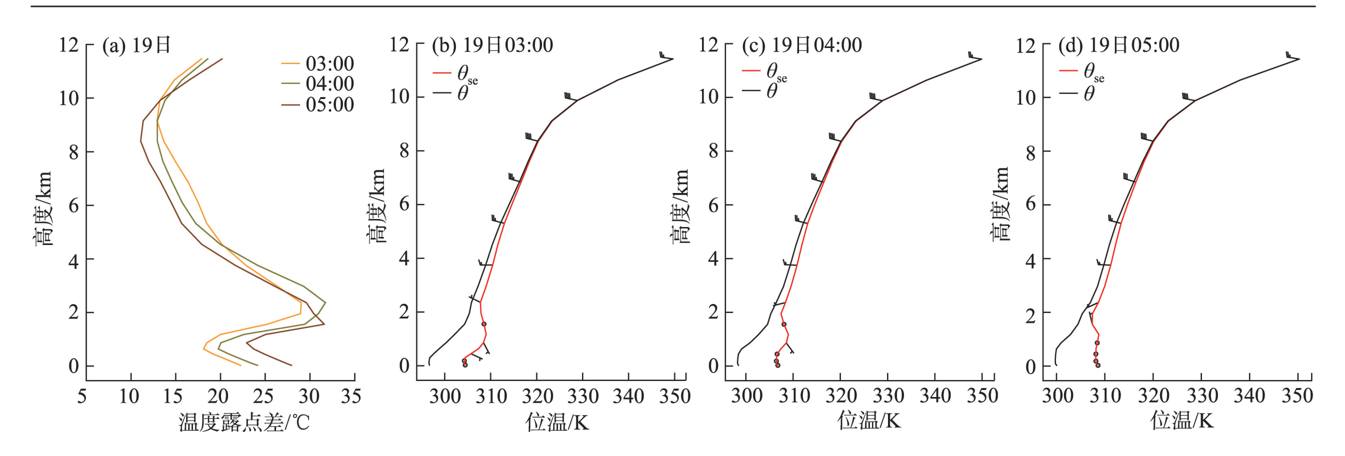


图12 张掖站3月19日温度露点差廓线及位温与假相当位温廓线

Fig. 12 Temperature-dewpoint difference profile, potential temperature, and pseudo-equivalent potential temperature profiles at Zhangye station on March 19

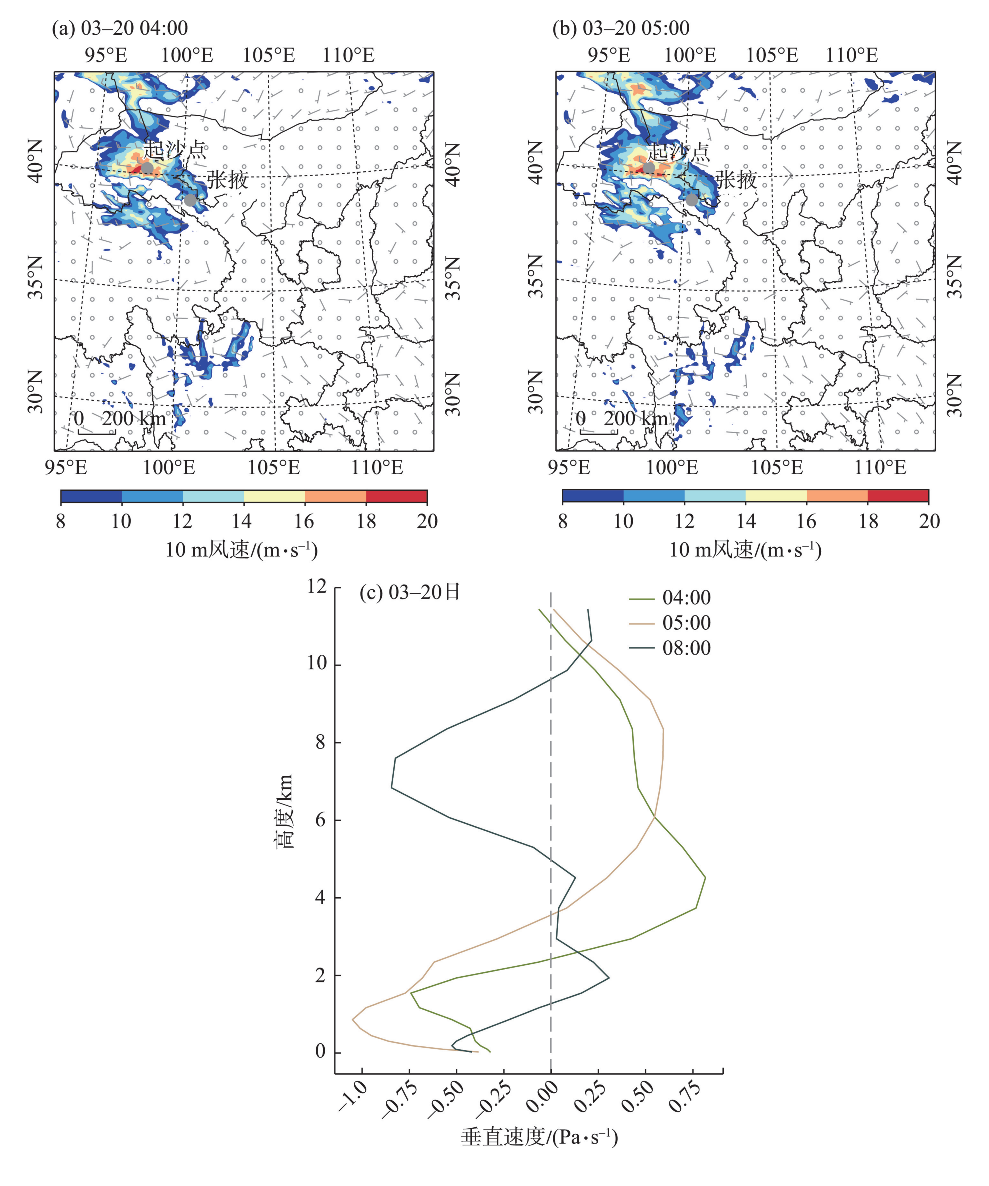


图13 张掖站3月20日10 m风速分布及垂直速度廓线

Fig. 13 Distribution of 10 m wind speed and vertical velocity profile at Zhangye station on March 20

高度范围内，上升运动最为强烈。这种上升运动，加上前期大气不稳定层结的存在，有助于将地表的沙尘扬起并输送到高空。

至08:00，张掖地区开始受到上游传输的沙尘影响。此时，1~4 km高度的大气垂直速度由负值转为正值，表明垂直运动从上升转为下沉，远距离传输而来的沙尘粒子在张掖地区沉降。这种动力过程表明，在不稳定层结和大风条件下，本地沙尘和远距离传输的沙尘共同加剧了张掖地区的沙尘天气。

4 结 论

2023年3月下旬发生在中国的一次沙尘天气持续时间长、影响范围较广，主要影响区域为甘肃省河西走廊地带。3月20日及21日分别在河西走廊地区的张掖武威及内蒙古西部出现AOD大值区。HYSPLT模式模拟结果显示此次影响西北地区河西走廊的气团可追踪到北疆地区。文章利用耦合了Shao04起沙参数化方案的WRF-Chem模式对此次沙尘过程的发生发展过程、影响范围及张掖市强沙尘成因进行诊断分析，得出以下结论：

（1）此次持续性沙尘天气过程为阶段性起沙，19日、20日、21日存在不同起沙区域，其影响的重点区域各不相同，20日影响河西走廊地区的沙尘传播较快。

（2）西北地区的沙尘向东南方向传播，依次影响河西走廊地区嘉峪关、张掖、金昌、武威及兰州5个城市，WRF-Chem模拟结果显示，张掖站的PM_{10}浓度在各城市中最高，达到6966.7 $\mu g \cdot m^{-3}$。

（3）张掖上游酒泉市内沙尘发生前低层大气存在不稳定层结，沙尘发生当日近地面出现超过16 $m \cdot s^{-1}$的强西北风，触发了强烈的上升运动，将沙尘颗粒裹挟至高空，并向下游传输，最终在张掖上空3~4 km的高度处沉降。

（4）此外，在受到上游沙尘输入影响之前，张掖低层大气已表现出不稳定特征。在地面大风速及风向辐合作用的共同影响下，触发了上升运动，将本地沙尘扬起，进一步加剧了沙尘天气的强度。这种局地和远距离传输共同作用的机制导致了张掖地区的高浓度PM_{10}沙尘事件。

参考文献(References)：

[1] 王式功, 董光荣, 陈惠忠, 等. 沙尘暴研究的进展[J]. 中国沙漠, 2000, 20(4): 5-12. [Wang Shigong, Dong Guangrong, Chen Huizhong, et al. Advances in studying sand-dust storms of China[J]. Journal of Desert Research, 2000, 20(4): 5-12.]

[2] Zhang X Y, Gong S L, Zhao T L, et al. Sources of Asian dust and role of climate change versus desertification Asian dust emission [J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(24): 1-4.

[3] Yang J H, Zhang Q, Lu G Y, et al. Climate transition from warm-dry to warm-wet in eastern northwest China[J]. Atmosphere, 2021, 12(12): 548.

[4] Yao J Q, Mao W Y, Chen J, et al. Recent signal and impact of wet-to-dry climatic shift in Xinjiang, China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2021, 31(21): 1283-1298.

[5] Deng H X, Tang Q H, Yun X B, et al. Wetting trend in Northwest China reversed by warmer temperature and drier air[J]. Journal of Hydrology, 2022, 613(74): 128435.

[6] Liu X M, Song H Q, Lei T J, et al. Effects of natural and anthropogenic factors and their interactions on dust events in northern China[J]. CATENA, 2021, 196(48): 104919.

[7] Yin Z C, Zhou B T, Duan M K, et al. Climate extremes become increasingly fierce in China[J]. The Innovation, 2023, 4(2): 100406.

[8] Wang Y, Yu H J, Li L, et al. Long-term trend of dust event duration over Northwest China[J]. The Science of The Total Environment, 2024, 951(53): 175819.

[9] Yu H J, Wang Y, Yuan L L, et al. Longer dust events over Northwest China from 2015 to 2022[J]. Atmospheric Research, 2024, 304(39): 107365.

[10] Gui K, Yao W R, Che H Z, et al. Record-breaking dust loading during two mega dust storm events over northern China in March 2021: Aerosol optical and radiative properties and meteorological drivers[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2022, 22(12): 7905-7932.

[11] 李岩瑛, 杨晓玲, 王式功. 河西走廊东部近50a沙尘暴成因、危害及防御对策[J]. 中国沙漠, 2002, 22(3): 82-86. [Li Yanying, Yang Xiaoling, Wang Shigong. Causes, impacts, and mitigation strategies of sandstorms in the eastern Hexi Corridor over the past 50 years[J]. Journal of Desert Research, 2002, 22(3): 82-86.]

[12] 王金玉. 沙尘污染对人群呼吸系统慢性损伤的初步研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2015. [Wang Jinyu. A Preliminary Study on Chronic Adverse Health Effects of Dust Pollution on Human Respiratory System[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2015.]

[13] 徐冉, 张碧辉, 安林昌, 等. 2000—2021年中国沙尘传输路径特征及气象成因分析[J]. 中国环境科学, 2023, 43(9): 4450-4458. [Xu Ran, Zhang Bihui, An Linchang, et al. Analysis of sand and dust storm transport paths characteristics and meteorological causes in China from 2000 to 2021[J]. China Environmental Science, 2023, 43(9): 4450-4458.]

[14] Igarashi Y, Inomata Y, Aoyama M, et al. Possible change in Asian dust source suggested by atmospheric anthropogenic radionuclides during the 2000s[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(18): 2971-

2980.

[15] Lee E H, Sohn B J. Recent increasing trend in dust frequency over Mongolia and Inner Mongolia regions and its association with climate and surface condition change[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(27): 4611–4616.

[16] 吕彦勋, 赵洪民, 王小军, 等. 中国西北城市沙尘天气变化特征——以兰州为例[J]. 干旱区研究, 2024, 41(7): 1112–1119. [Lyu Yanxun, Zhao Hongmin, Wang Xiaojun, et al. Dust weather changes in Northwest Chinese cities: Lanzhou as a case study[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(7): 1112–1119.]

[17] 李耀辉, 沈洁, 赵建华, 等. 地形对民勤沙尘暴发生发展影响的模拟研究——以一次特强沙尘暴为例[J]. 中国沙漠, 2014, 34(3): 849–860. [Li Yaohui, Shen Jie, Zhao Jianhua, et al. Simulation of terrain effect to the development of sandstorm in Minqin—take a heavy sandstorm for example[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(3): 849–860.]

[18] 李岩瑛, 张春燕, 张爱萍, 等. 河西走廊春季沙尘暴大气边界层垂直结构特征[J]. 气象, 2022, 48(9): 1171–1185. [Li Yanying, Zhang Chunyan, Zhang Aiping, et al. Vertical structure characteristics of atmospheric boundary layer in spring sandstorm over Hexi Corridor[J]. Meteorological Monthly, 2022, 48(9): 1171–1185.]

[19] 徐鑫强, 王鑫, 黄建平. 张掖及兰州榆中地区沙尘气溶胶粒子谱分布的观测研究[J]. 高原气象, 2011, 30(1): 208–216. [Xu Xinqiang, Wang Xin, Huang Jianping. Observational study on the particle size distribution of sand aerosol in Zhangye and Yuzhong of Lanzhou[J]. Plateau Meteorology, 2011, 30(1): 208–216.]

[20] 李红英, 李岩瑛, 王云鹏, 等. 河西走廊西部沙尘暴时空差异及其动力分析[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(10): 104–112. [Li Hongying, Li Yanying, Wang Yunpeng, et al. Temporal and spatial differences and dynamic analysis of sandstorms in the west of Hexi Corridor[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(10): 104–112.]

[21] 李岩瑛, 张强, 陈英, 等. 中国西北干旱区沙尘暴源地风沙大气边界层特征[J]. 中国沙漠, 2014, 34(1): 206–214. [Li Yanying, Zhang Qiang, Chen Ying, et al. Characteristics of the atmospheric boundary layer of sandstorms in arid regions of Northwest China [J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(1): 206–214.]

[22] 康丽泰, 陈思宇. 中国北方一次沙尘天气过程的数值模拟[J]. 中国沙漠, 2017, 37(2): 321–331. [Kang Litai, Chen Siyu. Numerical modeling of a dust storm process in northern China[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(2): 321–331.]

[23] 魏倩, 隆霄, 赵建华, 等. 边界层参数化方案对一次西北地区沙尘天气过程影响的数值模拟研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 163–177. [Wei Qian, Long Xiao, Zhao Jianhua, et al. Impact of boundary layer parameterization schemes on the simulation of a dust event over Northwest China[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 163–177.]

[24] Chen Y, Chen S Y, Zhou J, et al. A super dust storm enhanced by radiative feedback[J]. npj Climate and Atmospheric Science, 2023, 6(7): 1–11.

[25] 陈俊言, 贯雅雯, 张越, 等. 戈壁沙漠沙尘向青藏高原传输路径和传输机制：以2020年4月一次沙尘事件为例[J]. 中国沙漠, 2024, 44(3): 158–171. [Chen Junyan, Guan Yawen, Zhang Yue, et al. Transport pathways and mechanisms of dust from the Gobi Desert to the Tibetan Plateau: A case study of a dust storm in April 2020[J]. Journal of Desert Research, 2024, 44(3): 158–171.]

[26] 周旭, 张镭, 郭琪, 等. 强沙尘暴的数值模拟及PM_{10}浓度的时空变化分析[J]. 中国环境科学, 2017, 37(1): 1–12. [Zhou Xu, Zhang Lei, Guo Qi, et al. Numerical simulation of a strong dust storm and the spatial-temporal distribution of PM_{10} concentration[J]. China Environmental Science, 2017, 37(1): 1–12.]

[27] 尹志聪, 霍芊伊, 麻晓晴, 等. 触发2023年春季中国北方沙尘暴的沙源累积和天气扰动机制[J]. 大气科学学报, 2023, 46(3): 321–331. [Yin Zhicong, Huo Qianyi, Ma Xiaoqing, et al. Mechanisms of dust source accumulation and synoptic disturbance triggering the 2023 spring sandstorm in northern China[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2023, 46(3): 321–331.]

[28] Qor-El-Aine A, Béres A, Géczi G. Dust storm simulation over the sahara Desert (Moroccan and Mauritanian regions) using HYSPLIT [J]. Atmospheric Science Letters, 2021, 23(12): 1–13.

[29] 申彦波, 沈志宝, 汪万福. 2001年春季中国北方大气气溶胶光学厚度与沙尘天气[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2003, 47(2): 185–190. [Shen Yanbo, Shen Zhibao, Wang Wanfu. Atmospheric aerosol optical thickness and dusty weather in northern China in spring of 2001[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2003, 47(2): 185–190.]

[30] 杨晓玲, 李岩瑛, 陈静, 等. 河西走廊罕见强沙尘天气传输及其过程持续特征[J]. 干旱区地理, 2022, 45(5): 1415–1425. [Yang Xiaoling, Li Yanying, Chen Jing, et al. Transmission of rare strong dust and its process continuous characteristics in Hexi Corridor[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(5): 1415–1425.]

[31] 陈思宇, 贯雅雯, 赵丹, 等. 东亚沙尘气候效应对地面温度日较差影响的数值模拟[J]. 中国沙漠, 2022, 42(3): 127–138. [Chen Siyu, Guan Yawen, Zhao Dan, et al. Numerical simulation of the impact of East Asian dust climate effects on diurnal temperature range at the surface[J]. Journal of Desert Research, 2022, 42(3): 127–138.]

[32] 吕艳丽, 刘连友, 屈志强, 等. 中国北方典型沙尘天气特征研究[J]. 中国沙漠, 2012, 32(2): 447–453. [Lü Yanli, Liu Lianyou, Qu Zhiqiang, et al. Characteristics of dust storm weather in northern China[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(2): 447–453.]

Numerical simulation and diagnosis of a severe dust storm event in Northwest China

CAO Yidan, MA Minjin, KANG Guoqiang, CHEN Ran

(Key Laboratory of Drought Climate Change and Disaster Reduction in Gansu Province, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstracts: Dust storms are a major weather hazard in arid and semiarid regions, causing significant harm to human health and welfare and productivity. This study examined a severe dust storm event in northwest China using surface observation data from the National Meteorological Information Center, MODIS satellite data, and urban air quality data from March 18 to 23, 2023. The study combined the HYSPLIT backward trajectory model and the WRF-Chem atmospheric chemistry model to examine the dust source and impact range, focusing on the mechanisms behind the severe dust storm at Zhangye, a central site along the transport path. The main findings were that the dust storm affected much of northern China in phases, with dust emissions occurring in distinct regions on March 19, 20, and 21, each with unique transport ranges and impact areas. Dust in the Hexi Corridor primarily originated from Jiuquan. WRF-Chem simulations showed that the highest PM_{10} concentration occurred at Zhangye Station, reaching 6966.7 $\mu g \cdot m^{-3}$ The dust event in Zhangye originated from upstream dust transport and local dust emission. First, near-surface intense northwesterly winds over 16 $m \cdot s^{-1}$ near Jiuquan, under unstable atmospheric conditions, triggered upward movement, which lifted dust particles to high altitudes and transported them downstream, where they settled around 3-4 km above Zhangye. Second, before the arrival of upstream dust, Zhangye's lower atmosphere exhibited instability, and the convergence of strong surface winds and wind direction triggered local dust uplift, further intensifying the dust storm.

Keywords: severe dusty weather; numerical simulation; diagnostic analysis; Northwest China